Ingeniería Mecánica. Vol. 18. No. 1, enero-abril, 2015, p. 31-41 ISSN 1815-5944

Artículo Original

Evaluación del comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015

Evaluation of the fatigue behaviour of a butt welded joint of AISI 1015 steel

Pavel-Michel Almaguer-Zaldivar, Roberto-Andrés Estrada-Cingualbres

I. Universidad de Holguín. Facultad de Ingeniería. Centro de Estudios CAD-CAM. Holguín, Cuba
Correo electrónico: pavel@facing.uho.edu.cu

Recibido: 2 de mayo de 2014 Aceptado: 14 de diciembre de 2014

Resumen

Las uniones soldadas son un componente importante de una estructura, por lo que siempre es necesario conocer la respuesta de las mismas sometidas a cargas cíclicas. El objetivo de este trabajo es obtener la curva *S-N* de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 como material de aporte. Los ensayos a fatiga se realizaron de acuerdo a la norma ASTM en una máquina universal MTS810. Se utilizaron probetas de sección rectangular. El ciclo de carga fue asimétrico a tracción, con un coeficiente de asimetría de 0,1. Se obtuvo que la unión estudiada tiene un límite de resistencia a la fatiga de 178 MPa, a un punto de corte de 2 039 093 ciclos.

Palabras claves: unión soldada, fatiga, curva *S-N*, AISI 1015, electrodo E6013.

Abstract

Welded joints are an important component in structures, by this reason is necessary to know the behaviour of these elements under cyclic loads. The objective of this work is to obtain the S-N curve of the butt welded joint of AISI 1015 steel and electrode E6013 as the contribution material. Fatigue test was realized within the ASTM standard in the MTS810 testing machine. Rectangular cross section specimens was used. Cyclic loads was asymmetric tensile and the asymmetry ratio used was 0,1. In this study was obtained the fatigue limit equal to 178 MPa, at the cut point of 2 039 093 cycles.

Key words: welded joint, fatigue, *S-N* curve, AISI 1015 steel, electrode E6013.

Introducción

En las uniones soldadas presenta especial interés la Zona de Afectación Térmica (ZAT) que debido a las elevadas temperaturas alcanzadas durante la soldadura, experimenta transformaciones metalográficas importantes y también en sus propiedades mecánicas. Por esa razón es de esperar que en los casos de uniones soldadas sometidas a cargas cíclicas, el fallo de las mismas ocurra precisamente en esa zona.

La influencia que las discontinuidades geométricas tienen sobre la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas es un hecho ampliamente reconocido. En la ZAT, puede ser donde nuclean las discontinuidades que en general son las iniciadoras de las grietas de fatiga en las uniones soldadas. La fisura por fatiga comienza en un defecto local de la estructura, ya sea interno o externo, de hecho la propia geometría del cordón ya constituye una discontinuidad geométrica, que resulta ser un concentrador de esfuerzos.

Las tensiones residuales de soldadura también influyen en la resistencia a fatiga de la unión. Es conocida la influencia del tratamiento térmico post soldadura sobre el valor de estas tensiones, lográndose con el mismo un relajamiento en el valor de las mismas y por lo tanto un incremento de la vida en fatiga de la junta soldada. Sin embargo, los estudios de Nikitin y Besel [1], muestran que la relación existente entre la vida a fatiga de uniones soldadas y las tensiones residuales en el caso de aceros laminados AISI 304, así como el SAE 1045 no era significativa. Los ensayos a fatiga realizados por Barsoum [2] mostraron que el tratamiento térmico post soldadura a uniones de estructuras tubular no incrementaba la resistencia a la fatiga de la junta, al relajarse también las tensiones residuales de compresión. Pakandam y Varvani-Farahani [3] evaluaron la respuesta a fatiga de diferentes uniones mediante métodos energéticos.

Zhi *et al*., estudiaron la fatiga de uniones soldadas mediante distintos métodos y compararon los resultados experimentales y numéricos buscando modelos para predecir el comportamiento de la unión. [4] Por otro lado Susmel y Askes estudiaron la fatiga de uniones mediante la curva de Wohler modificada y entre sus conclusiones está que es necesario proveer a los ingenieros de curvas de diseño que permitan evaluar cualquier unión. [5]

Como se aprecia; la respuesta a fatiga de las uniones soldadas siempre es objeto de estudio de ingenieros e investigadores, debido a la complejidad del fenómeno y a la importancia y aplicación de estas uniones en los elementos de máquina y estructuras.

En este estudio se persigue como objetivo mostrar la curva *S-N* para una unión soldada a tope en la que se emplea el acero AISI 1015 como material base y el material de aportación es el electrodo E6013.

Métodos y Materiales

Para realizar este estudio se empleó un acero AISI 1015 como material base. Este es un acero que posee una buena soldabilidad.

Las dimensiones del cordón de soldadura fueron tomadas de la norma cubana NC 08-06:82 Costura de las uniones soldadas. Tipos y elementos del diseño. [6] En la revisión realizada antes de desarrollar este trabajo no se encontró una norma que rigiera la forma de las probetas para ensayos de tracción cíclica. Por esta razón se decidió utilizar probetas con forma de hueso de perro o *dog bones*. Las dimensiones utilizadas para fabricar estas probetas (ver Fig. 1) fueron tomadas de la norma cubana NC 04-72 Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope. [7] Además en trabajos previos se había utilizado esta configuración geométrica [8] o similar, sin el cambio de sección [9] para el ensayo a fatiga de uniones soldadas a tope. Se ensayaron 21 probetas que antes de ser sometidas al ensayo a fatiga fueron evaluadas mediante inspección visual y después mediante el ensayo de líquidos penetrantes [10]. No se detectaron defectos por los que fuera necesario desechar las probetas.

El material base que se utilizó para la soldadura se tenía en una plancha de 500 mm x 600 mm x 4 mm. La unión se realizó a tope sin preparación de bordes, con cordones a ambos lados atendiendo a las dimensiones y forma propuestas en la figura 1.

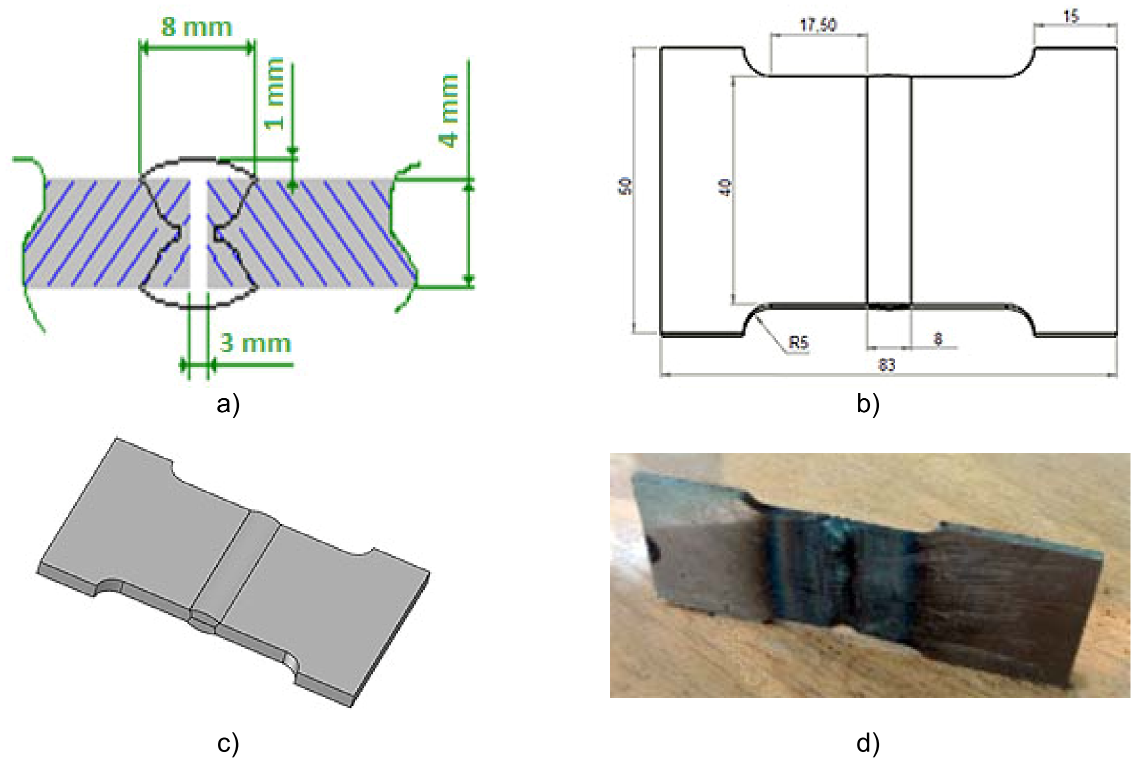


Fig. 1. Geometría de la probeta soldada. a) La junta se realiza sin preparación de bordes. b) Dimensiones de la probeta soldada. c) Isométrico. d) Probeta soldada para los ensayos a tracción.

Para comprobar que el material utilizado en los experimentos fuera el acero AISI 1015 se realizó el análisis químico de una muestra cuadrada de 5 cm de lado y 4 mm de espesor extraída del material base. El análisis se realizó en un cuantómetro ARL 3460. En la tabla 1 se muestran los resultados de este análisis para los principales elementos que permiten afirmar que el material utilizado es el acero en cuestión. Atendiendo al porcentaje de cada elemento de aleación presente en la muestra es posible corroborar que se trata del acero AISI 1015. La composición química del material base según la bibliografía está en la tabla 1, mientras que las propiedades mecánicas se encuentran en la tabla 2.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1015 [http://www.matweb.com]

Acero AISI 1015	**Elementos**				
Composición	Carbono (%)	Manganeso (%)	Silicio (%)	Azufre (%)	Fósforo (%)
Típica	0,13- 0,18	0,30 - 0,60	0,17 - 0,37	≤0,05	≤0,04
Medida	0,166 090	0,504 210	0,027 460	0,005 780	0,013 850

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero AISI 1015 [http://www.matweb.com]

Material	**Propiedades**					
	σ_B (MPa)	σ_f (MPa)	σ_{-1} (MPa)	μ	δ (%)	ψ (%)
AISI 1015	420	315	230	0,29	39	61
E6013	431 - 510	392	-	-	20 - 28	35 - 60

Para realizar las uniones soldadas se utilizó el proceso de soldadura manual por arco eléctrico. El electrodo utilizado es el E6013.

La tabla 2 también muestra las propiedades mecánicas del depósito. Las propiedades mecánicas mostradas se obtuvieron de los datos proporcionados por el fabricante en el envase de los electrodos. Como se aprecia en la primera de ellas, la resistencia mecánica de este material de aporte es algo superior que la del material base, referida en la misma tabla, por lo tanto la selección de este electrodo es posible. Se eligió el diámetro del electrodo de 3,2 mm y se efectúo una pasada por cada lado de la unión.

Para determinar los parámetros del proceso de soldadura se elaboró una macro, denominada *WeldParam*, valiéndonos del Visual Basic para Aplicaciones que tiene incorporado el programa *Microsoft* Excel 2003. Con esta macro es posible calcular los carbonos equivalentes según diferentes criterios, la

temperatura de precalentamiento, parámetros del proceso de soldadura, así como otros de índole energético que son importantes en la realización de la presente investigación.

Descargar el manual de usuario de la macro desde http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/public/descargas/manual_usuario_macro_WeldParam.pdf y la macro desde http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/public/descargas/macro_tecn_soldadura.rar

Los valores obtenidos de las diferentes magnitudes necesarias para realizar la soldadura fueron:

- Intensidad de corriente: 90 A - 120 A.
- Tensión: 24 V - 26 V.
- Número de cordones: 2.
- Velocidad de soldadura: 59,57 mm/min - 79,42 mm/min.
- Número de electrodos (para elaborar una probeta): 0,421.
- Tiempo total (para elaborar una probeta): 81,216 s - 60,912 s.
- Máquina: TRI-ARC 504. Rectificador con capacidad entre 70 A - 500 A y 23 V- 40 V.

Uno de los factores que más se tiene en cuenta es, sin duda alguna, la concentración de tensiones de manera local que tiene lugar en aquellos puntos donde existen cambios de sección propios de la geometría del elemento, o defectos que tengan lugar durante el proceso de fabricación.

Las uniones soldadas, debido a su geometría, son ya concentradores de tensiones, siendo el cambio de sección entre el metal base y el sobrecordón una discontinuidad importante, a lo que se suma la disminución de la tenacidad en la ZAT; que propiciarán el fallo de la unión ante las carga variables.

La unión soldada objeto de estudio fue ensayada a fatiga, para ello fue necesario determinar los valores de los parámetros del ciclo de carga. El régimen de carga empleado fue a tracción asimétrica.

El primer parámetro determinado fue la tensión máxima $\sigma_{\max}$ (ecuación 1). Considerando que el fallo de la unión debe producirse en la ZAT, se consideraron las propiedades del material base para calcular ese valor.

La tensión máxima del ciclo en un primer nivel de carga se tomó como dos terceras partes del límite de fluencia del acero AISI 1015. Para decidir esto se consideró que la fatiga del elemento ocurre a valores de tensión inferiores al límite de fluencia.

$$\sigma_{\max} = \frac{2}{3}\sigma_f \qquad (1)$$

El valor de la tensión máxima calculada mediante la expresión anterior es igual a $\sigma_{\max}$ = 210 MPa a la que correspondió una carga máxima $P_{\max}$ = 33,60 kN.

En esta investigación, los siguientes niveles de carga se determinaron a medida que se avanzó en la realización de los experimentos. Esto se debió a la gran dispersión que existe en los resultados de los ensayos a fatiga. La lógica que se siguió para determinar los siguientes niveles de carga fue la siguiente: se disminuyó el valor de carga hasta que las probetas ensayadas igualaron o superaron el valor de 1 500 000 ciclos, para los que se corresponde el límite de resistencia a la fatiga en el caso de las uniones según la norma ASTM E 739 – 91 [11]. Para los ensayos se fijó la razón de asimetría del ciclo *R*= 0,1. La frecuencia de aplicación de la carga fue de 14 Hz. Como criterio de fallo se utilizó el de fractura total. El ensayo se interrumpía cuando eran aplicados 1 500 000 ciclos de carga. La temperatura del laboratorio era de 20 ºC ± 2 ºC.

Los ensayos se realizaron a 4 niveles de carga. Esto obedeció a la forma en que se desarrollan los experimentos a fatiga. Para obtener el límite de resistencia a la fatiga se ensayan probetas a valores de carga que se van disminuyendo, de manera empírica, hasta que varias probetas resistan el número de ciclos necesarios para considerar que se ha alcanzado dicho límite. Una vez establecido el mismo se procede a ensayar probetas a valores intermedios de carga para lograr el ajuste de la curva. En nuestro caso, después de estudiar el primer nivel de carga, para el segundo se escogió aplicar una carga P_{max}= 28,5 kN. Las probetas ensayadas con esa carga resistieron mayor cantidad de ciclos que los definidos para considerar el límite de resistencia a la fatiga de uniones, por lo tanto se fijó que la tensión que surgía con esa carga, se correspondía con el valor de tensión correspondiente al límite de resistencia a la fatiga que se buscaba en la investigación. Fue necesario entonces ajustar los puntos intermedios de la curva y para ello se analizaron dos niveles de carga más, seleccionando cargas de 31,5 kN y 30,5 kN, respectivamente. Esta manera de realizar los ensayos a fatiga se conoce como método de la escalera o sube y baja.

Los ensayos a fatiga se realizaron en el laboratorio de estructuras de la Universidad de Burgos, España, se usó una máquina universal MTS810 de fabricación estadounidense.

En este trabajo se realizó un análisis fractográfico a todas las probetas que fallaron a fatiga mediante microscopía óptica (MO) y electrónica de barrido (SEM) utilizando un Estereomicroscopio *Zeiss Stemi* SV11 y un microscopio electrónico de barrido *JEOL* JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental por Rayos X, respectivamente.

Análisis estadístico del ensayo a fatiga

Para el tratamiento de los resultados de los ensayos a fatiga se aplicó en esta investigación la norma ASTM E 739 – 91 *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ε-N) Fatigue Data* [11] que rige el tratamiento estadístico de los mismos.

La distribución de vida de fatiga (en cualquier ensayo) es desconocida y de hecho puede ser bastante compleja en ciertas situaciones. Para los propósitos de simplificar el análisis, se supone en la práctica que se describe en [11] que el logaritmo del número de ciclos a fatiga sigue una distribución normal, y que la varianza del logaritmo de la vida a fatiga es constante en todo el rango de la variable independiente (es decir, se asume que la dispersión en el logaritmo de *N* es la misma tanto a bajos como a altos niveles de tensión o deformación).

De manera general, es posible relacionar la vida a fatiga con la tensión del ciclo mediante la fórmula que sigue, ver ecuación 2

$$\log N = A + B(S) \tag{2}$$

Donde *A* y *B* son los coeficientes de ajuste de la ecuación.

El logaritmo de *N* se usa como la variable dependiente y se denota por *Y*; mientras que la variable independiente se denota por *X* y puede ser S, ε, $\log S$ o $\log \varepsilon$. En este estudio se utilizará la tensión máxima del ciclo, que la llamaremos posteriormente S_{max}.

De acuerdo a lo planteado aquí la linealización de la ecuación de la dependencia entre *N* y S_{max} toma la forma [11]: ver ecuación 3

$$Y = A + BX \tag{3}$$

El tamaño de la muestra *k*, de acuerdo a la misma norma mencionada antes puede estar entre 12 y 24 para datos confiables [11]. En esta investigación fue de 21 probetas ensayadas.

El porciento de replicación es igual al 81 %. Se le debe prestar atención a que el porciento de replicación indica que porción de la cantidad de probetas ensayadas puede ser usada para obtener una estimación de la variabilidad de los ensayos replicados. En la bibliografía [11] plantean que debe estar entre 75 y 88 porciento. El valor calculado en esta investigación corresponde a 17,01 probetas. Como sea se realizaron las estimaciones en base a las 21 probetas ensayadas.

Los estimadores para los coeficientes de la ecuación (3) se determinaron mediante las expresiones siguientes: ecuaciones 4 y 5

$$\hat{A} = \overline{Y} - \hat{B}\overline{X} \tag{4}$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^{k}\left(X_i - \overline{X}\right)\left(Y_i - \overline{Y}\right)}{\sum_{i=1}^{k}\left(X_i - \overline{X}\right)^2} \tag{5}$$

Los símbolos “casquete” (^) y “barra superior” (-) significan “estimador” y “valor medio” respectivamente.

Los valores de los estimadores así calculados son $\hat{A}$ = 11,775 716 240 y $\hat{B}$ = -0,031 058 404.

Sustituyendo estos valores en la expresión (2) se obtiene la ecuación que relaciona el número de ciclos N y la tensión máxima del ciclo S_{max}: ver ecuación 6

$$\log N = 11{,}77571624 - 0{,}031058404 \times S_{max} \tag{6}$$

La varianza del logaritmo del número de ciclos es $\hat{\sigma}$ =0,393 980 430.

Los intervalos de confianza para los valores de *A* y *B* pueden ser establecidos usando la distribución *t* que aparece en la referencia [7].

Los intervalos de confianza así determinados son los siguientes:

- Para el estimador de *A*: [8,623 104 537; 14,928 327 930].
- Para el estimador de *B*: [-0,047 148 940; -0,014 967 870].

Ahora es necesario probar la certeza del uso del modelo lineal asumido (ecuación 3). Si el ensayo es realizado de manera tal que sean observados más de un valor de *Y* para algunos valores de X_i (X_i son los niveles de carga e $i \geq 3$) entonces es posible realizar una prueba estadística basada en la distribución *F* que aparece en [7]. El logaritmo de *N* en la *j-ésima* probeta ensayada en el *i-ésimo* nivel de *X* es denotado para este análisis como Y_{ij}.

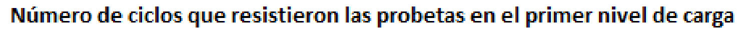
En nuestro estudio los ensayos a fatiga se realizaron a l=4 diferentes niveles de carga y fueron observados diferentes valores m_i de *Y* en cada valor de X_i. La hipótesis de linealidad expresada en la ecuación 3 es rechazada cuando el valor de *F* calculado usando la expresión 7 es mayor que F_p determinado de [7] para el nivel de significancia deseado. Para un nivel de significancia del 95 % F_p = 3,6823.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{l} \frac{m_i\left(\hat{Y}_i - \bar{Y}_i\right)^2}{(l-2)}}{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m_i} \frac{\left(\hat{Y}_{ij} - \bar{Y}_i\right)^2}{(k-l)}} \quad (7)$$

El parámetro *F* calculado tiene un valor de 3,4577 siendo menor que F_p por lo tanto se acepta la hipótesis de linealidad del modelo que se emplea para el estudio de los resultados del ensayo a fatiga de la unión soldada.

Resultados

De acuerdo a lo expresado en la sección anterior se realizaron experimentos a 4 niveles de carga. En el primer nivel de carga se obtuvo una gran dispersión de los valores de los ciclos *N* a los que fallaron las probetas (ver Fig. 2). Cuando se habían realizado experimentos en este nivel se observó que la probeta número 2 había resistido muy pocos ciclos, solo 24 624. Por esta causa se decidió ensayar una probeta más con una carga de 33,6 kN con el objetivo de disminuir la dispersión en el valor medio de los ciclos. Como la sexta probeta ensayada resistió 284 893 ciclos, se logra un mejor ajuste de la curva en el primer nivel de carga.



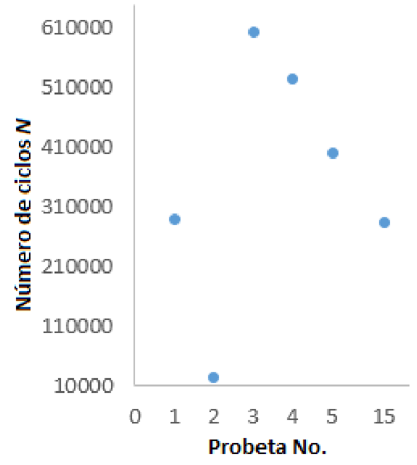


Fig. 2. Dispersión de los números de ciclos que resistieron las probetas en el primer nivel de carga

En el segundo nivel sobrepasaron los 1 500 000 ciclos, que se correspondía con el valor del número de ciclos determinado para detener cada experimento. Luego los niveles 3 y 4 se utilizaron para ajustar los valores intermedios de la curva.

La tabla 3 muestra los valores de los parámetros de cada ciclo a los que se realizaron los ensayos.

Tabla 3. Parámetros de los ciclos de carga para los diferentes niveles a los que se realizaron los ensayos a fatiga

Parámetro	Nivel			
	1	2	3	4
Carga máxima $P_{\max}$ (kN)	33,60	28,500	31,500	30,500
Carga mínima $P_{\min}$ (kN)	3,36	2,850	3,150	3,050
Carga media P_{med} (kN)	18,48	15,675	17,325	16,775
Carga amplitud P_a (kN)	15,12	12,825	14,175	13,725
Rango de la carga ΔP (kN)	30,24	25,650	28,350	27,450
Tensión Máxima $\sigma_{\max}$ (MPa)	210,00	178,100	196,900	190,600
Tensión mínima $\sigma_{\min}$ (MPa)	21,00	17,810	19,690	19,060
Tensión media σ_{med} (MPa)	115,50	97,955	108,295	104,830
Tensión amplitud σ_a (MPa)	94,50	80,145	88,605	85,770
Rango de tensión $\Delta\sigma$ (MPa)	189,00	160,290	177,210	171,540
Coeficiente de asimetría R	0,10	0,100	0,100	0,100

En la figura 3 se muestran la cantidad de ciclos que resistió cada probeta y la cantidad de probetas que fueron ensayadas en cada nivel de carga.

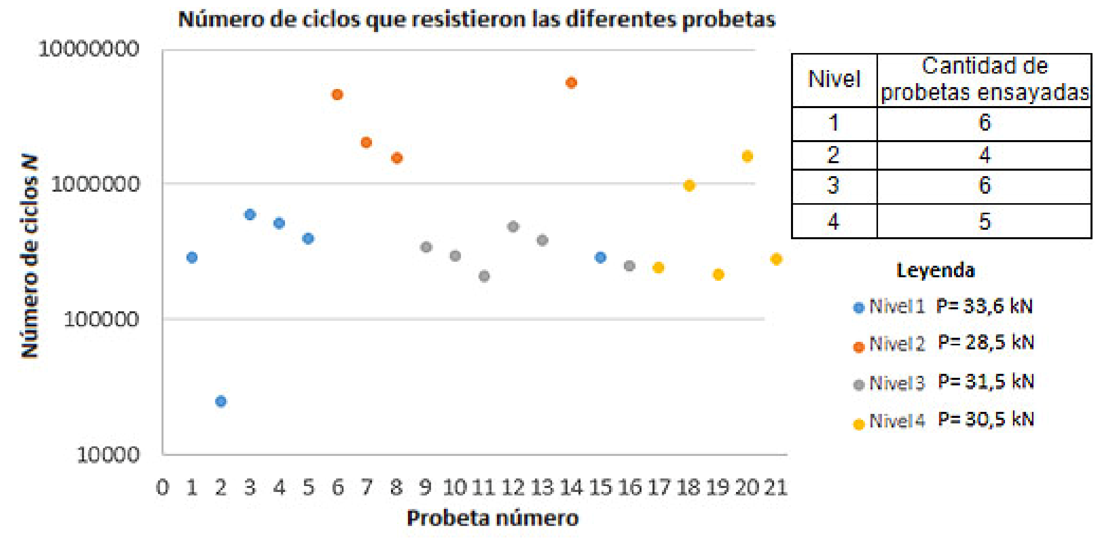


Fig. 3. Número de ciclos que resistió cada probeta y cantidad de probetas ensayadas a cada nivel de carga

Para ensayar los siguientes niveles de carga se mantiene constante el coeficiente de asimetría del ciclo y se disminuye el valor de carga y por ende de tensión hasta que la probeta falle a 1500000 ciclos. Los datos que se le proporcionaban a la máquina de ensayo para configurar los experimentos son las cargas.

Como se mencionó antes, para el segundo nivel se disminuyó la carga máxima hasta P_{max} = 28,5 kN, por lo que la tensión máxima es igual a 178,1 MPa. La tabla 4 muestra los valores de los parámetros del ciclo de carga y el número de ciclos de carga a las que fueron sometidas las diferentes probetas a este nivel. Según se aprecia en la figura 3 solo se ensayaron 4 probetas en el segundo nivel de carga. Para decidir esta cantidad de ensayos se consideró que las probetas fallaron a una gran cantidad de ciclos (superiores a los 1 500 000), incluso algunas no fallaron y por lo tanto se plantean los valores de tensiones y cargas a este nivel para caracterizar al límite de resistencia a la fatiga de la unión ensayada.

Es necesario entonces determinar los valores intermedios para la construcción de la curva *S-N*.

El tercer nivel de carga se realizó con una carga máxima P_{max} = 31,5 kN que provocó una tensión máxima $\sigma_{\max}$ = 196,9 MPa. Para el cuarto nivel de carga los parámetros P_{max} y $\sigma_{\max}$ son iguales a 30,5 kN y 190,6 MPa respectivamente.

Con los ensayos realizados a la unión soldada se construyó una curva *S-N*. La expresión que relaciona las tensiones y el número de ciclos es log*N* =11,775716240 - 0,031058404 x S_{max} que fue ajustada según un modelo lineal de acuerdo al procedimiento que se describe en la bibliografía [7].

Curva *S-N* de la unión ensayada

A continuación se muestra en la figura 4 la curva *S-N* de la unión soldada ensayada en este trabajo. La curva se obtuvo a partir de los datos experimentales procesados según [11] como se ha descrito en este trabajo. La primera parte de la curva que ha sido ajustada mediante un modelo lineal muestra la ecuación de ajuste de la misma, mientras que el punto de corte se encuentra para un valor de tensión igual a 178 MPa y 2 039 093 ciclos.

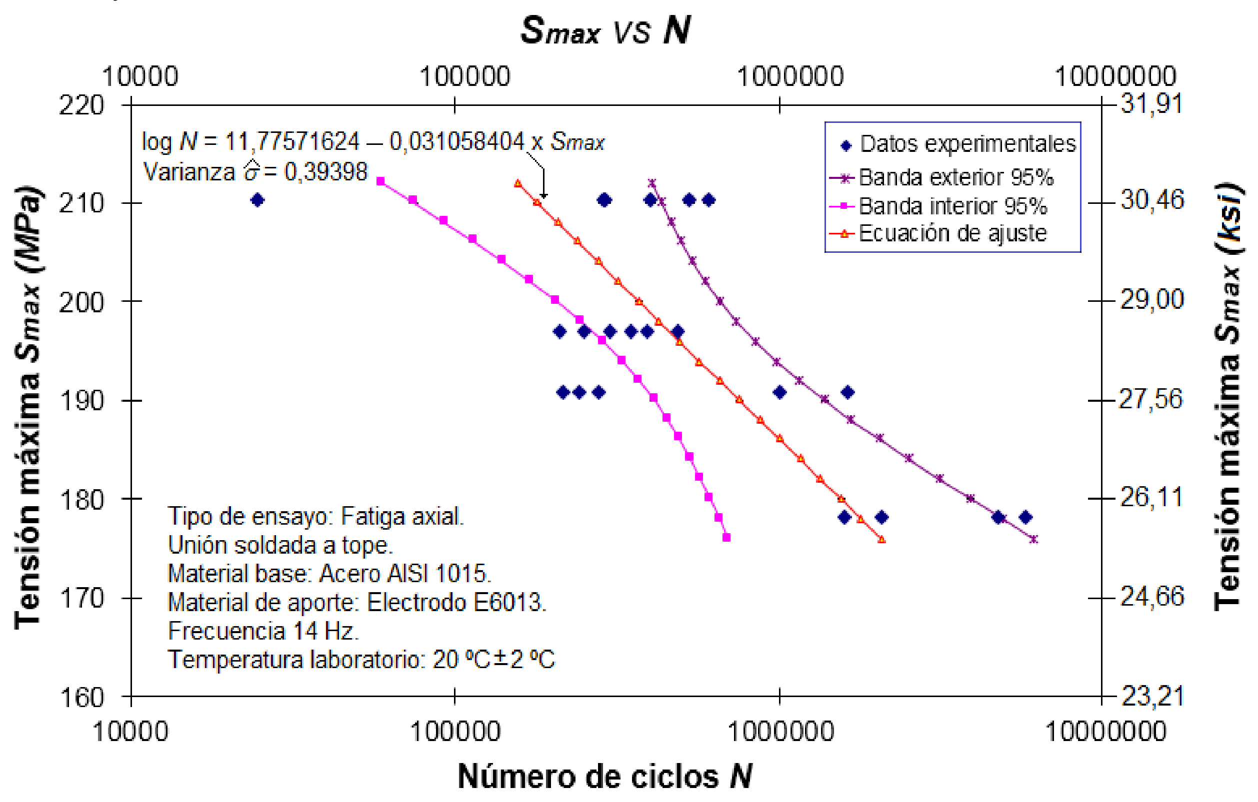


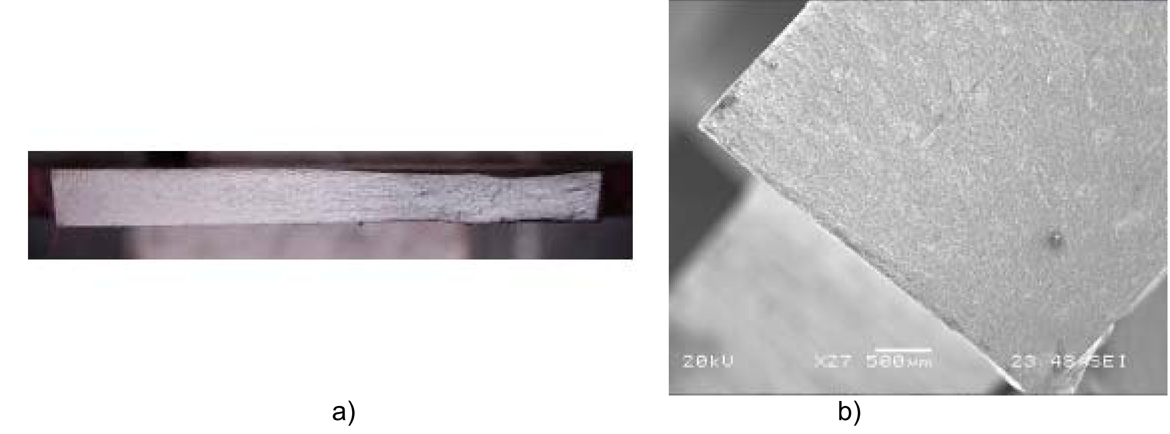
Fig. 4. Curva *S-N* de la unión soldada estudiada

Análisis fractográfico

Es de destacar que la forma de todas las roturas es similar. La grieta siempre se inicia en un defecto, que puede ser propio del material, de los procesos de mecanizado para la fabricación de las probetas y los más importantes en este aspecto, los de la soldadura, pues fueron los que más influyeron en las fallas.

De forma general las grietas siempre se inician en el defecto y comienzan a desarrollarse con un frente de grieta semielíptico. La zona de rotura frágil, que ocurre producto a la sobrecarga estática de la probeta muestra una extricción propia de la rotura de elementos sometidos a tracción. Solo se muestran las observaciones de las probetas 7 y 20.

Probeta 7: La probeta falló al final de la ZAT. La grieta comenzó a desarrollarse en una gota de metal fundido. El punto de inicio está señalado con una flecha roja en la figura 5 a). Se observa la zona de crecimiento de la grieta y bien diferenciada por la textura y por la extricción que ocurre en la zona donde se produce el fallo por sobrecarga estática a tracción.



a) b)

Fig. 5. a) Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 7. b) Observación mediante SEM del defecto donde se inicia la grieta de rotura por fatiga de la probeta 7

La zona donde se encuentra el punto de inicio de la grieta, observada mediante SEM se muestra en la figura 5 b). La grieta comienza a crecer a partir de un punto donde había quedado una pequeña gota de metal de aportación, la que al caer en este lugar y solidificarse provocó una discontinuidad geométrica que fue suficiente para generar la grieta de fatiga que se desarrolló luego al ser aplicada las cargas variables en el tiempo.

Probeta 20: La probeta falla en la ZAT. La grieta se origina en el detalle señalado en la figura 6 a) que fue identificado mediante los líquidos penetrantes. A partir de este punto se comenzó a desarrollar la grieta que fue creciendo mediante el conocido frente semielíptico hasta alcanzar el tamaño de grieta que provoca el fallo de la probeta. Las observaciones mediante microscopía óptica y electrónica de barrido están en las figuras 6 b) y c), respectivamente. En ella se aprecia el defecto, que tiene una forma inicial alargada con una longitud de estimada de 0,6923 mm y un ancho aproximado de 0,0385 mm.



Fig. 6. a) Defecto identificado mediante líquidos penetrantes donde se inició la grieta en la probeta 20. b) Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 20. c) Observación mediante SEM de la zona de inicio de la grieta en la probeta 20.

De forma general es posible decir que en todas las probetas que se produjo el fallo ante la acción de las cargas cíclicas ocurrió una grieta que se inició en un defecto y fue creciendo con un frente semielíptico hasta que se rompía la probeta ensayada. Se apreciaba claramente la zona donde se desarrollaba la grieta y la zona de rotura frágil, donde tenía lugar una extricción debida a la sobrecarga estática.

Discusión

Después de realizado el análisis estadístico de los resultados de los ensayos a fatiga de la unión soldada, se procede a la presentación de los mismos, según la norma ASTM E 468 - 90 *Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials* [12]. Esta plantea que es necesario mostrar datos como las características del material base, procesos tecnológicos realizados, probetas utilizadas, máquina de ensayos utilizada, condiciones de los experimentos para que se le pueda dar a la información proporcionada la mayor utilidad posible. Estos datos se mencionaron antes.

Los resultados de los diferentes ensayos se muestran en la tabla 4. Según la norma ASTM E 468 - 90 solo es preciso exponer dos parámetros del ciclo en la tabla 4 de los resultados de los ensayos. En la tabla 4 se muestran la amplitud del ciclo S_a y la tensión máxima S_{max}. Los dos valores de tensión se expresan tanto en el Sistema Internacional de Unidades como en el Sistema Inglés para facilitar la búsqueda de algún valor. También se encuentran el número de ciclos que resistió cada probeta y se realizan observaciones sobre la naturaleza del fallo.

Tabla 4. Resultados del ensayo a fatiga

Probeta	S_a (MPa/ksi)	$S_{\max}$ (MPa/ksi)	Ciclos	Observaciones
1	94,500/13,710	210,2/30,5	290047	Falla
2	94,500/13,710	210,2/30,5	24624	Falla. Falta de fusión
3	94,500/13,710	210,2/30,5	602953	Falla
4	94,500/13,710	210,2/30,5	523170	Falla. Material Base (BM)
5	94,500/13,710	210,2/30,5	399580	Falla en la ZAT, y también en el MB
6	80,145/11,624	178,1/25,8	4671010	No falla
7	80,145/11,624	178,1/25,8	2045073	Rompe al final de la ZAT La grieta comienza en una gota de metal fundido, figura 5
8	80,145/11,624	178,1/25,8	1575206	No falla
9	88,605/12,851	196,9/28,6	345930	Falla. Coalescencia de grietas, que comienzan a desarrollarse en planos diferentes
10	88,605/12,851	196,9/28,6	298920	Falla en MB y en ZAT
11	88,605/12,851	196,9/28,6	210595	Falla
12	88,605/12,851	196,9/28,6	485503	Falla
13	88,605/12,851	196,9/28,6	389095	Falla
14	80,145/11,624	178,1/25,8	5644514	No falla
15	94,500/13,710	210,2/30,5	284893	Falla
16	88,605/12,851	196,9/28,6	248862	Falla
17	85,770/12,875	190,6/27,6	240303	Falla. Coalescencia de grietas
18	85,770/12,875	190,6/27,6	994490	Falla
19	85,770/12,875	190,6/27,6	214885	Falla
20	85,770/12,875	190,6/27,6	1607851	Falla. Empezó en detalle, figura 6
21	85,770/12,875	190,6/27,6	277211	Falla. Presentó una grieta en el cordón, que empezó en un poro. Presentó coalescencia de grietas

En el caso de las probetas 6, 8 y 14 que fueron ensayadas en el segundo nivel de carga y no fallaron se examinaron mediante líquidos penetrantes después de ser retiradas de la máquina de ensayo a fatiga. Estas no mostraron haber desarrollado grietas superficiales que pudieran ser identificadas mediante esa prueba.

Otros autores también observaron el crecimiento de grietas con un frente semieliptíco a partir de defectos iniciales en la unión. Por ejemplo: Peng realizó ensayos a uniones soldadas a tope con una configuración similar a la utilizada en este trabajo [8], Biek *et al*., quienes desarrollaron el estudio del crecimiento de grietas en uniones soldadas solicitadas a flexión [13] y Gaul *et al*., que estudiaron la fatiga de uniones soldadas por puntos. [14].

En la probeta 17 se desarrolló una grieta más grande, que presentó coalescencia con una más pequeña. Fue posible observar, como después que las dos grietas se unieron siguieron creciendo con un frente común.

Conclusiones

De acuerdo al ajuste realizado a la ecuación se obtuvo que se puede considerar la tensión máxima de 178,1 MPa; a un punto de corte de 2 039 093 como el límite de resistencia a la fatiga de la unión soldada.

Existe dispersión en los datos experimentales, incluso en niveles inferiores de carga se aprecia que algunas probetas fallan a valores de ciclos menores que en el nivel superior. En el nivel 1, la probeta 3 resistió 602 593 ciclos a una carga de 33,6 kN, mientras que en el nivel 3, a una carga de 31,5 kN, inferior a la primera; la probeta 9 solo resistió 345 930 ciclos. En el nivel 4, donde la carga era menor aun (30,5 kN) la probeta 21 soportó 277 211 ciclos. También se puede decir que la probeta 20, ensayada también en el nivel 4 resistió 1 607 851 ciclos, o sea, sobrepasó el número de ciclos base que se plantea en la norma ASTM E 739 - 91 [11] para las uniones. La causa principal de esto se debe al proceso de soldeo empleado que fue de soldadura manual por arco eléctrico. Como es sabido este proceso depende

en gran medida del operario y por lo tanto es más probable que aparezcan diferencias entre una unión y otra, lo que no sucede en los procesos automatizados.

Las grietas de fatiga siempre comenzaron en un defecto. Este defecto, al ser una discontinuidad geométrica se comportaba como un concentrador de tensiones en el que nucleaba la grieta. Luego se desarrollaron siguiendo un frente de grieta semielíptico, que también fue observado por otros autores, hasta que ocurría la rotura, al agotarse la capacidad resistente de la unión por la disminución del área de la sección transversal. En la zona donde tenía lugar la rotura final se apreció una extricción, característica de la rotura por tracción estática, o sea, se aprecia que el fallo final tenía lugar por la sobrecarga estática cuando la grieta crecía y por ende, disminuían las dimensiones transversales de la probeta.

Se demostró que dada la gran dispersión de los resultados en cada nivel de carga, es necesario aumentar la cantidad de probetas a ensayar, con lo que se lograría un mejor ajuste de la curva.

Referencias

1. Nikitin I, Besel M. Correlation between Residual Stress and Plastic Strain Amplitude during Low Cycle Fatigue of Mechanically Surface Treated Austenitic Stainless Steel AISI 304 and Ferritic-Pearlitic Steel SAE 1045. Materials Science and Engineering A. 2008;491:297-303. ISSN 0921-5093. DOI 10.1016/j.msea.2008.03.034-1-s2.0-s0921509300803237-main.pdf
2. Barsoum Z, Lundbäck A. Simplified FE welding simulation of fillet welds – 3D effects on the formation residual stresses. Engineering Failure Analysis. 2009;16(16):2281-9. ISSN 1350-6307.
3. Pakandam F, Varvani Farahani A. Fatigue damage assessment of various welded joints under uniaxial loading based on energy methods. International Journal of Fatigue. 2011;33:519–28. ISSN 0142-1123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2010.09.019.
4. Xiao ZG, Tao Chen, Zhao XL. Fatigue strength evaluation of transverse fillet welded joints subjected to bending loads. International Journal of Fatigue. 2012;38:57–64. ISSN 0142-1123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2011.11.013.
5. Susmel L, H A. Modified Wöhler Curve Method and multiaxial fatigue assessment of thin welded joints. International Journal of Fatigue. 2012;43:30-42. ISSN 0142-1123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.026.
6. Oficina Nacional de Normalización. Costura de las uniones soldadas. Tipos y elementos del diseño. NC 08-06:82. La Habana. Cuba: 1982.
7. Oficina Nacional de Normalización. Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope. NC 04-72. La Habana. Cuba: 1972.
8. Peng Hsiang C, Tso-Liang T. Numerical and experimental investigations on the fatigue evaluation of butt -welded joints. Metals and Materials International. 2008;14:361-72. ISSN 2005-4149. DOI 10.3365/met.mat.2008.06.361.
9. Pyttel B, Grawenhof P, Berger C. Application of different concepts for fatigue design of welded joints in rotating components in mechanical engineering. International Journal of Fatigue. 2012;34:35-46. ISSN 0142-1123. DOI :10.1016/j.ijfatigue.2011.01.007.
10. American Society fot Testing Materials. ASTM. Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination. Norma ASTM E 165 – 02. Estados Unidos: ASTM International. 2002.
11. American Society fot Testing Materials. ASTM. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (♏-N) Fatigue Data. ASTM E 739 – 91. ASTM International. 2004.
12. American Society fot Testing Materials. ASTM. Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials. ASTM E 468 – 90. ASTM International. 2004.
13. Baik B, Yamada K, Ishikawa T. Fatigue crack propagation analysis for welded joint subjected to bending. International Journal of Fatigue. 2011;33:746–58. ISSN 0142-1123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2010.12.002.
14. Gaul H, Weber G, Rethmeier M. Evaluation of fatigue crack propagation in spot welded joints by stiffness measurements. International Journal of Fatigue. 2011;33:740-5. ISSN 0142-1123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2010.12.005.